

ДЕЯКІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ КОРОЗІЙНОЇ ВТОМИ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО УСТАТКУВАННЯ

В. В. Панасюк, І. М. Дмитрах

SOME APPROACHES TO CORROSION FATIGUE ASSESSMENT FOR STRUCTURAL COMPONENTS OF HEAT-AND-POWER ENGINEERING EQUIPMENT

V. V. Panasyuk, I. M. Dmytrakh

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79601, Україна*

Abstract Some approaches for assessment of corrosion fatigue of materials and structural components for power engineering equipment are presented. Here, the main attention was paid for so-called “non-traditional” damages which are not predicted by normative instructions and which are occurred as result of long time of exploitation or as result of different reflections of operating regimes of equipment. Methods for strength and durability assessment of materials and structural elements are stated on the fracture mechanics basis. Expert assessment of technical state of heat-and-power engineering equipment is considered with taken into account of the actual data of metal properties and operating conditions of equipment.

Вступ. Відомо, що різноманітні корозійно-втомні пошкодження конструктивних елементів суттєво впливають на термін їх безпечної експлуатації, і даний час, до 70 % поломок і, як наслідок, простоїв теплоенергетичного обладнання відбувається за їх рахунок [1,2]. Зафіксовані [2] численні випадки пошкоджень та руйнувань основних елементів задовго до вичерпання їхнього розрахункового ресурсу (рис. 1), як результат так званих, „нетрадиційних” пошкоджень, тобто таких, які не прогнозуються нормативними інструкціями і виникають внаслідок тривалої роботи устаткування або різноманітних відхилень від експлуатаційних режимів.

У зв'язку з цим існує ряд специфічних науково-технічних проблем, пов'язаних із забезпеченням заданого ресурсу та безпечної експлуатації відповідальних конструкцій та об'єктів теплової енергетики.

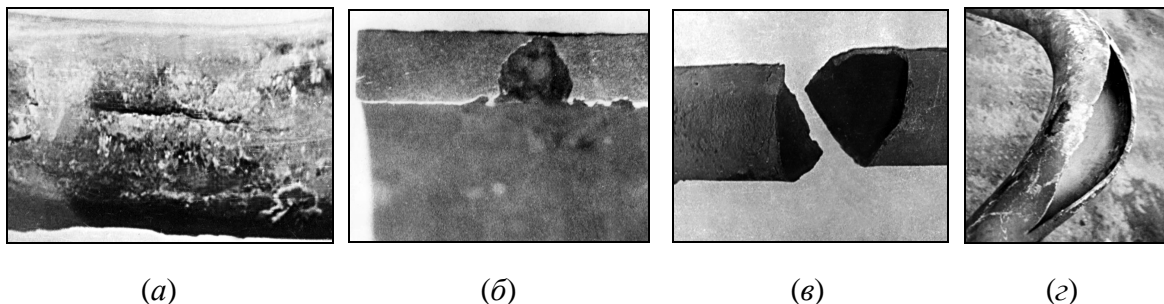


Рис. 1. Характерні типи експлуатаційних пошкоджень та руйнувань трубопроводів ТЕС [2]: (а) зовнішній вигляд пошкодження труби правого бокового екрану котла ТГМ-84 після 59 тис. год експлуатації; (б) ураження „стоянковою” корозією паровідвідної труби котла типу ТП-230: вигляд перерізу стінки труби з наскрізною корозійною виразкою; (в) крихке руйнування труби екрану котла ТГМ-84 після 84 тис. год експлуатації; (г) руйнування згину пароперепускної труби конвективного пароперегрівача ($\varnothing 159 \times 15$ мм, сталь 12Х1МФ) котла ТГМ-84 (14 МПа, 545 °С).

Корозійно-втомна пошкоджуваність експлуатованого металу елементів теплоенергетичного устаткування. Аналіз експлуатаційних пошкоджень основних конструктивних елементів енергоблоків ТЕС показує, що основними характерними особливостями процесів корозійної втоми є по-перше – певна локалізація в залежності від особливостей стану металевої поверхні, а по-друге – їх стадійність.

Початкова локалізація процесу руйнування спричинена існуванням на поверхні металу певних неоднорідностей чи включень, що призводить до утворення локальних корозійно активних ділянок. Наслідком цього є утворення корозійно-механічних пітингів та виразок, які слід розглядати як потенційні концентратори напружень [1, 3, 4]. Вирішальна роль на цьому початковому етапі корозійного руйнування відводиться електрохімічним процесам, що активуються механічними циклічними напруженнями [5, 6]. Другий етап руйнування матеріалу характеризується утворенням, від вже існуючих пітингів, перших тріщиноподібних дефектів, так званих, фізично коротких тріщин – тріщин, довжина яких, практично, не перевищує віддалі між головними мікроструктурними бар'єрами [7]. На цьому етапі процесу корозійного руйнування зростає роль механічно-втомного фактора. Подальший перебіг процесу корозійно-втомного руйнування приводить до розвитку та злиття мікротріщин, після чого настає формування макротріщини, яка розвивається переважно в глибину матеріалу. Досягнення нею критичних розмірів [1, 3] призводить до спонтанного катастрофічного руйнування елементу конструкції.

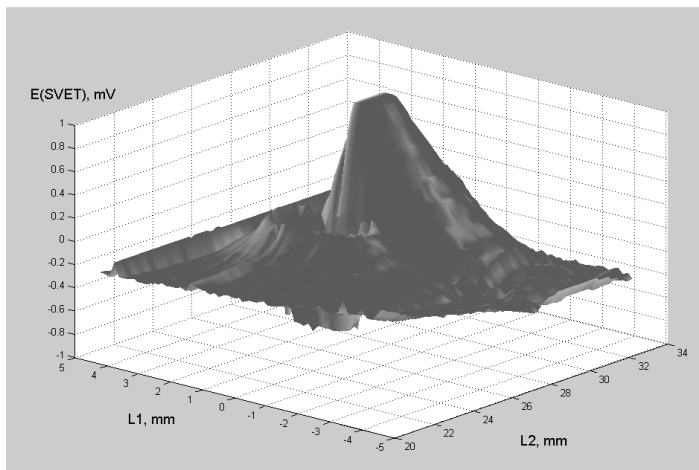
Слід зауважити, що для конкретного конструктивного елементу, в залежності від його геометричних розмірів та умов експлуатації властива своя лімітуюча стадія процесу корозійно-механічного руйнування [1, 4]. Так, наприклад, для тонкостінних трубопроводів стадії утворення корозійно-механічних виразок та зародження макротріщини будуть визначальними з точки зору оцінки їх роботоздатності та довговічності. В цей же час для труб із товщиною стінки в декілька десятків міліметрів (наприклад, трубопроводи живильної води енергоблоків ЗКТ), стадія розвитку макротріщини в глибину матеріалу буде визначати їх залишкову довговічність [1-3].

У зв'язку з цим для розробки експертних систем технічної діагностики роботоздатності основних конструктивних елементів енергоблоків необхідні методи оцінки корозійно-втомної пошкоджуваності металу для кожної із зазначених стадій процесу руйнування матеріалу.

Оцінка розвитку корозійно-втомних пітингів та виразок. Тут найбільш ефективними є методи, що ґрунтуються на даних електрохімічного сканування деформованої поверхні спеціальними зондами – методи SVET [7, 8]. Це дає змогу одержати карту розподілу локальних корозійних струмів навколо корозійно-втомного пошкодження типу пітинга (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Корозійно-втомне пошкодження типу пітингу в трубній сталі 08X18H12T (а) в середовищі з рН6,5 та карта розподілу локальних корозійних струмів навколо нього (б), яка одержана методом скануючого електрохімічного зонду SVET [7].

Густина локального корозійного струму на дні пітингу $i_{pit} \left[\text{mA} / \text{cm}^2 \right]$ визначається як:

$$i_{pit} = -176 \cdot E_{SVET}, \quad (1)$$

де E_{SVET} – покази скануючого електрохімічного зонду в мВ.

Слід зауважити, що значення i_{pit} на порядок перевищують значення інтегрального корозійного струму на поверхні металу, що виміряні стандартними потенціостатичними методами.

Розвиток пітингу протягом часу τ є функцією густини локального корозійного струму i_{pit} , та розмаху прикладених циклічних напружень $\Delta\sigma$, тобто:

$$c = F_{pit}(i_{pit}, \Delta\sigma, \tau), \quad (2)$$

де c – характерний розмір пітингу.

Оцінка поверхневого корозійно-втомного тріщиноутворення. Дана оцінка здійснюється на основі розробленої [9, 10] модельної схеми корозійної втоми матеріалу, коли процес утворення поверхневих корозійно-втомних тріщин пов'язаний з інтенсивністю електрохімічного розчинення циклічно деформованої поверхні (рис. 3). При цьому було використано встановлене співвідношення [9] між довжиною поверхневої тріщини a , характеристичним значенням прикладеного напруження σ_s та параметрами електрохімічного розчинення металу:

$$F(a) = \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{max}} \right)^m \cdot Q, \quad (3)$$

де $F(a)$ – певна функція довжини тріщини; σ_s – характеристичне значення напруження, починаючи з якого відбувається суттєва електрохімічна активація поверхні металу в межах кожного циклу навантаження [9]; σ_{max} – максимальне напруження циклу навантаження; m – константа системи „матеріал-середовище”; Q – інтегральний об'єм розчиненого металу з одиниці площі поверхні впродовж заданого числа циклів навантаження N .

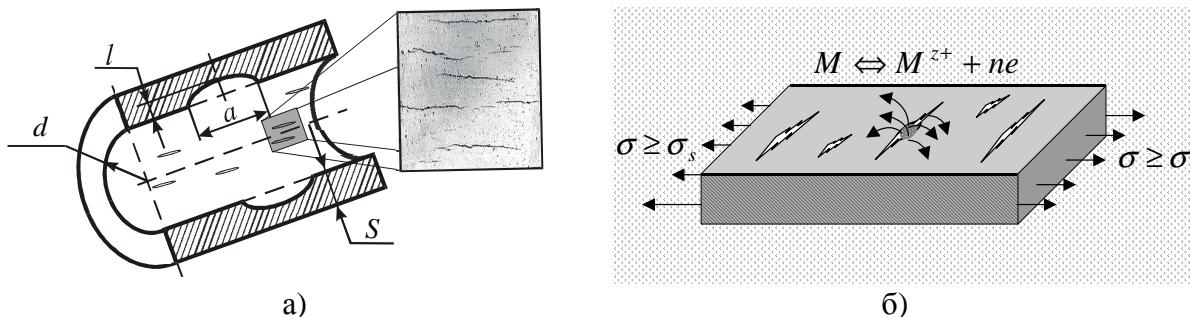


Рис. 3. Розташування та характер тріщиноподібних дефектів на внутрішній поверхні трубопроводу (а) та схема корозійно-втомних процесів на циклічно-деформованій поверхні (б).

Значення параметра Q визначається на основі наступної залежності [1, 5]:

$$Q = \frac{M}{z \cdot F \cdot \rho} \cdot \frac{1}{f} \cdot \int_0^N I_{corr}(N) dN, \quad (4)$$

де M – молекулярна вага металу; z – число електронів, що приймають участь у реакції електрохімічного розчинення металу; F – стала Фарадея; ρ – густина металу; f – частота циклічного навантаження; $I_{corr}(N)$ – залежність інтегрального корозійного струму на

циклічно деформованій поверхні від числа циклів навантаження N , що для всіх розглянутих випадків задовільно описується степеневою залежністю виду [10]:

$$I_{corr} = I_0 \cdot N^k, \quad (5)$$

де I_0 та k – константи системи „матеріал-середовище”.

На основі співвідношень (3) – (5) була запропонована та апробована (див. рис. 3) наступна формула [10] для визначення числа циклів навантаження N (періоду) до зародження поверхневої корозійно-втомної тріщини довжиною a :

$$N = \left[\frac{A \cdot a^n}{\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{max}} \right)^m \cdot \frac{M}{z \cdot F \cdot \rho} \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{I_0}{k+1}} \right]^{\frac{1}{k+1}}, \quad (6)$$

де A та n – сталі умов випробовування.

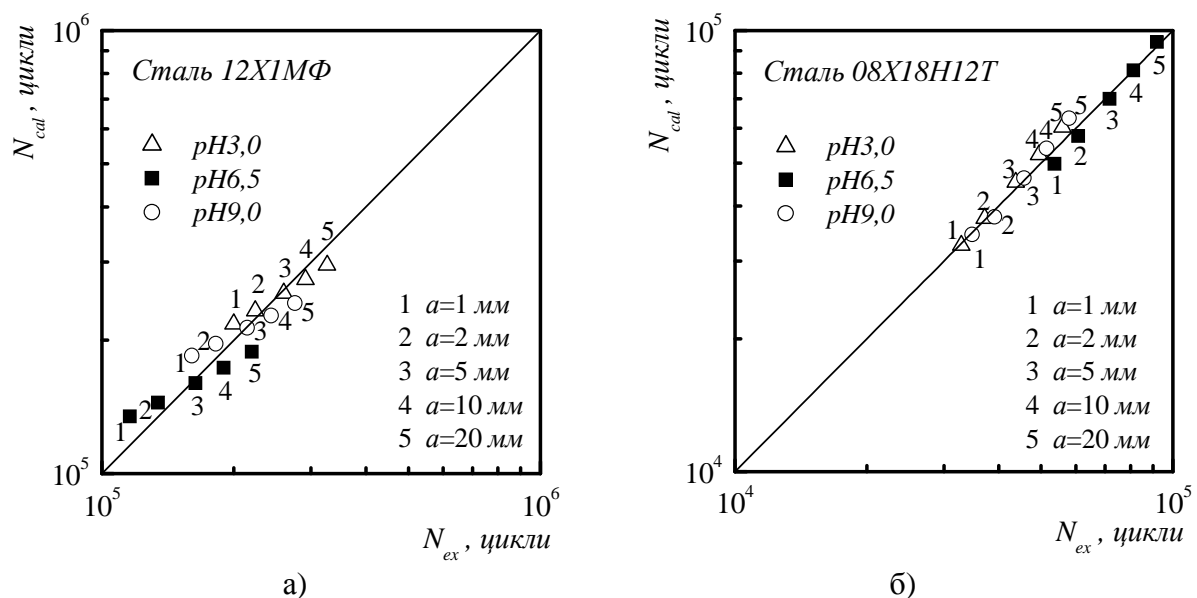


Рис. 4. Порівняння експериментальних та розрахункових значень періоду зародження поверхневої корозійно-втомної макротріщини різної довжини в сталях 12X1MΦ (а) та 08X18H12T (б) в середовищах з різним pH [11].

Оцінка допустимої глибини тріщиноподібних дефектів. При вирішенні цієї задачі, основна проблема полягає у виборі критерію, по якому проводиться розрахунок, оскільки за базу можуть бути прийняті різні стадії процесу руйнування трубопроводу [1, 2]. Це залежить від мети розрахунку, що пов'язана з умовами роботи конструкції та правилами її технічної експлуатації.

Тут розглядається випадок розрахунку допустимої глибини l_* тріщини для забезпечення безаварійної роботи трубопроводу між двома черговими профілактичними оглядами. Його пропонується здійснювати за критерієм приросту Δl , виявленого тріщиноподібного дефекту глибиною l , тобто [1]:

$$\Delta l \leq \Delta l_* \text{ при } \Delta N = \Delta N_*, \quad (7)$$

де Δl_* – допустимий приріст тріщини в глибину; ΔN_* – планове число циклів навантаження протягом експлуатації трубопроводу між двома профілактичними оглядами.

Фізично це означає оцінку за деякою граничною швидкістю розвитку корозійно-втомної тріщини протягом запланованого терміну експлуатації трубопроводу $(dl/dN)_*$:

$$dl/dN \leq (dl/dN)_* \quad (8)$$

Так, наприклад, якщо ми виберемо значення $(dl/dN)_* = 10^{-4}$ мм/цикл, то це означає, що наявні в трубопроводі тріщини глибиною l_i можуть максимально розвинутиись на 1 мм протягом 10000 циклів навантаження.

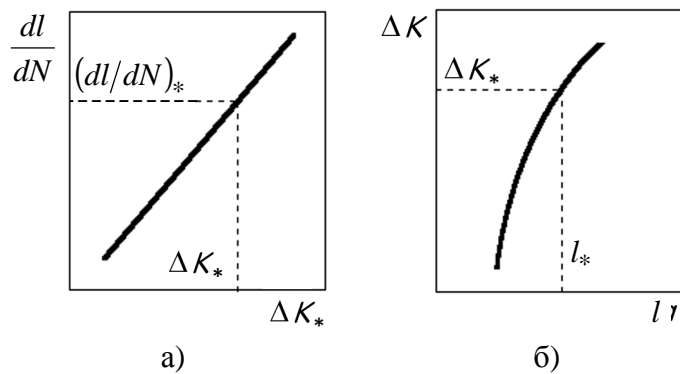


Рис. 5. Схема розрахунку допустимої глибини тріщини оподібного дефекту в стінці трубопроводу: а - діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості матеріалу; б - значення коефіцієнта інтенсивності напружень від глибини тріщини

Процедура визначення допустимої глибини тріщини l_* в стінці трубопроводу, при заданих значеннях Δl_* та ΔN_* , є наступною (рис. 5). Спочатку визначають граничну швидкість росту корозійно-втомної тріщини $(dl/dN)_*$ як

$$(\frac{dl}{dN})_* = \Delta l_* / \Delta N_* \quad (9)$$

За цією величиною з діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості матеріалу, що розглядається, визначають відповідне значення розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_* (рис. 5а). На основі цього значення розраховують допустиму глибину тріщини l_* із формули для коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I [1, 2], яка є функцією робочого навантаження на трубопровід, його геометричних розмірів та геометрії тріщиноподібного дефекту (рис. 5б).

Таблиця 1. Водно-хімічні режими роботи енергетичного устаткування.

№ з/п	Назва водного режиму	Хімічний склад середовища
1	Борне регулювання	1 %-й розчин H_3BO_3 +KOH до pH8
2	Борне регулювання з відхиленням за хлоридами	1 %-й розчин H_3BO_3 +KOH до pH8+ +5 мг/кг Cl^- (10,5 мг/кг KCl)
3	Борне регулювання з відхиленням за нітратами	1 %-й розчин H_3BO_3 +KOH до pH8+ +10 мг/кг NO_3^- (16,3 мг/кг KNO_3)
4	Аміачний	Дистильована вода + NH_3 до pH9
5	Гідразинно-аміачний (I)	H_2O + NH_3 до pH9+100 мкг/кг N_2H_4
6	Гідразинно-аміачний (II)	H_2O + NH_3 до pH9+100 мкг/кг N_2H_4
7	Аміачний з відхиленням за хлоридами	H_2O + NH_3 до pH9+ +10 мг/кг Cl^- (16,5 мг/кг NaCl)
8	Аміачний з домішками соляної кислоти	H_2O + NH_3 до pH9+ + 10 мг/кг Cl^- (HCl); pH3,95
9	Аміачний з домішками оцтової кислоти	H_2O + NH_3 до pH9+ + 10^{-5} моль/л CH_3CH_2COOH ; pH5,9

В якості прикладу нижче (рис. 6) наведені оцінки допустимої глибини тріщиноподібних дефектів в залежності від планованого терміну експлуатації трубопроводів із сталей 08X18H12T та 12X1МФ [11]. Підрахунки проведені для труби з товщиною стінки $S = 42$ мм та внутрішнім діаметром $d = 219$ мм при максимальному тиску теплоносія $p \approx 35$ МПа. При цьому, взято до уваги типові водно-хімічні режими роботи енергоблоків, а також модельні режими [1, 2], в яких враховано можливі відхилення складу середовища від номінального і наявність шкідливих домішок (табл. 1).

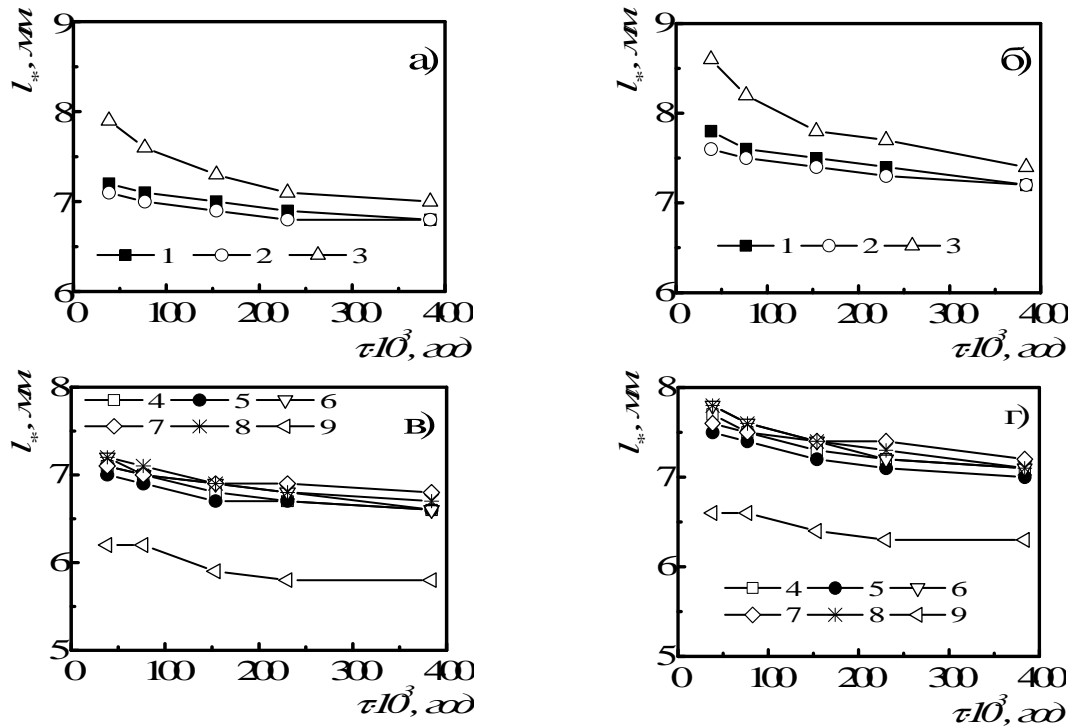
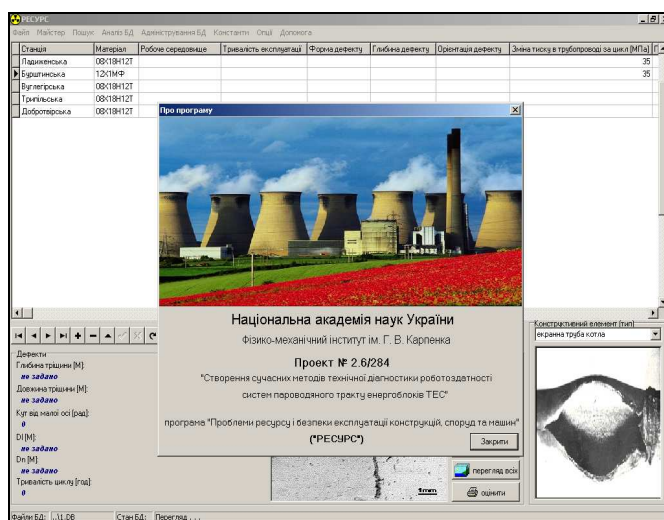
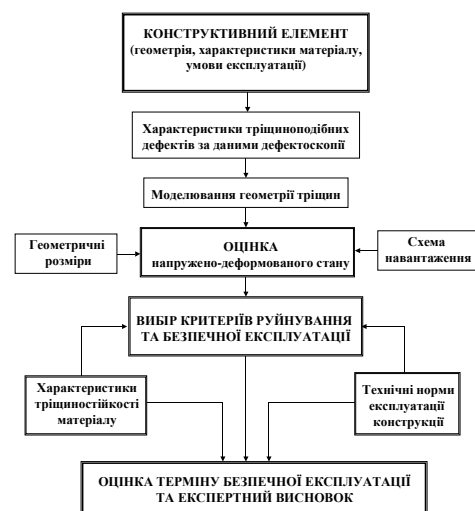


Рис. 6. Оцінка допустимої глибини тріщиноподібного дефекту в залежності від планованого терміну експлуатації трубопроводу зі сталі 08X18H12T (а, б) та 12X1МФ (в, г): а, в – $l/a = 1/20$; б, г – $l/a = 1/3$. Нумери точок на графіках відповідають порядковому номеру середовища в табл. 1.



а)



б)

Рис. 7. Головне вікно (а) та принципова блок-схема експертної системи (б).

Показано, що значення допустимої глибини тріщиноподібних дефектів l_* залежать від матеріалу, форми дефекту та складу середовища. Діапазон її зміни, в залежності від цих чинників, становить приблизно 6...9 мм для трубопровідних систем

енергоблоків ТЕС, що розглядались. Найменші значення допустимої глибини тріщини l_* виявлено в трубопроводі зі сталі 12Х1МФ при аміачному водному робочому режимі з домішками оцтової кислоти (рН5,9). Отже чинник експлуатаційного середовища відіграє важливу роль для експертної оцінки технічного стану елементів конструкцій енергетичного устаткування, що містить тріщиноподібні дефекти різної форми.

Розглянуті вище підходи до оцінки корозійної втоми металів покладені в основу експертної системи, яка призначена для оцінки роботоздатності та розрахунку залишкової довговічності експлуатованих елементів конструкцій пароводяного тракту енергоблоків ТЕС, встановлення термінів їх безаварійної роботи між двома черговими профілактичними оглядами, а також для аналізу причин їх руйнувань, як результату зародження та розвитку тріщиноподібних дефектів (рис. 7). Система містить реляційну базу даних, яка дозволяє знаходити зображення пошкодженого конструктивного елемента чи зразка за експлуатаційними параметрами, а також здійснювати розрахункові оцінки допустимих розмірів дефектів у залежності від планованого терміну експлуатації конструктивного елемента.

Література

1. Дмитрах І.М., Панасюк В.В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. – Львів: НАН України. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, 1999. – 341 с.
2. Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Сташук, Л. Тот / Довідниковий посібник під. ред. І.М. Дмитраха. – Київ: Видавничий дім НАН України „Академперіодика”, 2005. – 378 с.
3. Панасюк В.В., Дмитрах І.М., Вайнман А.Б., Мухопад Г.В. Характеристики корозійної тріщиностійкості матеріалів та їх значення в проблемі забезпечення експлуатаційної надійності теплоенергетичного обладнання. Частина II // Енергетика та електрифікація. – 1999. – № 1. – С. 34-44.
4. Dmytrakh I.M. On corrosion fatigue initiation from notches and the local corrosion fracture approaches // In.: „Notch Effects in Fatigue and Fracture”. – NATO Science Series: II. Mathematics, Physics and Chemistry – The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. – 2001. – Vol. 11. – P. 331-346.
5. Dmytrakh I.M., Akid R. and Miller K.J. Electrochemistry of deformed smooth surfaces and short corrosion fatigue crack growth behaviour // British Corrosion Journal. – Vol. 32, № 2. – 1997. – P. 138-144.
6. Akid R., Dmytrakh I.M. Influence of surface deformation and electrochemical variables on corrosion and corrosion fatigue crack development. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 1998. – Vol. 21, № 7. – P. 903-911.
7. Akid R., Dmytrakh I.M., and Gonzalez-Sanchez J. Fatigue Damage Accumulation: Aspects of environmental interaction // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – Т. 42, № 1. – С. 45-55.
8. Dmytrakh I., Akid R., Syrotyuk A. On pitting corrosion of stainless steels induced by cyclic stress // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – Спец. вип. № 5. – С. 39-42.
9. Dmytrakh I.M., Syrotyuk A.M. and Hrabovskyi R.S. Model of surface fatigue crack nucleation as result of corrosion deformation interactions // Proc. 14th European Conference on Fracture. – Cracow (Poland): UK: EMAS Publishing. – 2002. – Vol. I - P. 489-496.
10. Дмитрах І.М., Сиротюк А.М., Грабовський Р.С. Поверхневе тріщиноутворення під час циклічного деформування сталей у водних середовищах // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2003. – Т. 39, № 4. – С. 53-60.
11. Дмитрах І., Сиротюк А. Корозійно-втомне тріщиноутворення та оцінка довговічності трубопроводів теплоенергетичного призначення // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під заг. ред. В.В. Панасюка – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2004. – С. 465-470.